

Rendements et paramètres du sol après 20 ans de semis direct et de labour

Andreas Chervet¹, Lorenz Ramseier¹, Wolfgang G. Sturny¹, Marc Zuber¹, Matthias Stettler², Peter Weisskopf³, Urs Zihlmann³, Ingrid Martínez G.³ et Thomas Keller³

¹Office de l'agriculture et de la nature du canton de Berne, Service de la protection des sols, 3052 Zollikofen, Suisse

²Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires HAFL, 3052 Zollikofen, Suisse

³Agroscope, Institut des sciences en durabilité agronomique IDU, 8046 Zurich, Suisse

Renseignements: Thomas Keller, e-mail: thomas.keller@agroscope.admin.ch



Figure 1 | Parcelle de suivi à long terme Oberacker, Inforama Rütli, Zollikofen. Vue aérienne du 29.06.2004. (Photo: Gabriela Brändle, Agroscope)

Introduction

Divers arguments écologiques, économiques et climatiques plaident autant en faveur qu'en défaveur du semis direct (SD). Différentes études montrent qu'en cas de fortes précipitations, cette pratique réduit non seulement le ruissellement en surface, mais qu'il limite également l'érosion du sol, grâce à un sol non perturbé en surface et recouvert de restes végétaux (Soane *et al.* 2012). De plus, le SD contribue à réduire le compactage de la couche sous-jacente du sol, car avec ce système, les roues du tracteur circulent totalement à la surface du sol et non, comme c'est le cas avec le système de labour (L), en partie dans la raie de labour à 25 cm de profondeur (Chamen *et al.* 2003). Toutefois, le semis direct est supposé réduire la productivité par rapport au labour (Karlen *et al.* 2013; Soane *et al.* 2012;

Pittelkow *et al.* 2014). Cet argument perd de son acuité, lorsque la rotation est adaptée au SD et qu'un couvert végétal permanent est maintenu à l'aide de résidus végétaux (Pittelkow *et al.* 2014).

Le travail du sol, la rotation et la gestion des résidus végétaux exercent une influence décisive sur la teneur en C_{org} et la dynamique des éléments nutritifs du sol. Comme les restes de récolte ne peuvent pas être enfouis dans le sol, lorsque celui-ci n'est pas travaillé, les concentrations de C_{org} dans la couche supérieure du sol proche de la surface sont plus élevées avec le SD qu'avec le labour.

Outre la teneur en C_{org} , le type de sol et le climat sont deux autres facteurs déterminants pour le choix du système cultural. Dans les zones de climat tempéré d'Europe centrale, les avantages du SD sur les limons sableux sont peu exploités.

Matériel et méthodes

Site, conception de l'essai et travail du sol

En 1994, la parcelle de suivi à long terme Oberacker a été mise en place à l'Inforama Rütli de Zollikofen, près de Berne, à une altitude de 557 m, à titre d'essai de démonstration (fig. 1). Le limon sableux faiblement humique (18 % d'argile, 23 % de limon) est classé comme un sol de terre brune (Eutric Cambisol) (WRB 2006). Le site affiche une température moyenne annuelle de 9,3 °C et une pluviosité annuelle moyenne de 1109 mm. Les systèmes culturaux SD et L ont été comparés sur six soles contiguës de 18 m de large (9 m pour chaque système), séparées par des bandes herbeuses de 3 m de large. L'essai a été réalisé en bandes avec six cultures différentes. Pour le L, le terrain a été labouré de manière conventionnelle à environ 25 cm de profondeur jusqu'en 2002. À partir de 2003, le labour on-land a été introduit (à partir de 2006, à une profondeur d'environ 15 cm seulement). Dans le cas du L, le lit de semences était préparé avec un outil de travail du sol entraîné à la prise de force jusqu'en 2006; après cette date, il n'y a plus eu de préparation du lit de semences. Afin d'égaliser les inégalités du lit de semences lors du semis, le tracteur est équipé d'un tasse-avant et d'un semoir de semis direct à l'arrière. Dans le cas du SD, les cultures sont semées sans que le sol n'ait été ameubli au préalable. Un sillon de semis est simplement ouvert dans le sol à l'aide de socs à disques, puis refermé une fois les semences déposées. Avec ce système, le sol n'est remué que pour la récolte des betteraves sucrières. Depuis 2007, la rotation comprend les cultures suivantes: pois protéagineux – blé d'automne – féveroles – orge d'automne – betteraves sucrières – maïs d'ensilage. Le travail du sol, le semis, l'entretien des cultures et la récolte sont effectués par les machines commerciales des entrepreneurs.

Relevé des rendements, fumure et protection phytosanitaire

La rotation a été adaptée plusieurs fois au fil des ans. Compte tenu de la santé des plantes et de la maîtrise des adventices, les responsables ont veillé à optimiser la qualité du sol et à maximiser le rendement de la rotation en utilisant un minimum de pesticides. Avec les deux systèmes, le semis des cultures a lieu le même jour et tous les restes de récolte sont laissés sur place. Pour les cultures récoltées à la batteuse, les relevés de rendement se font sur l'ensemble de la sole. Pour le maïs et les betteraves sucrières, le rendement est relevé sur seize surfaces partielles sélectionnées de manière aléatoire. La comparaison porte sur les rendements relatifs (L = 100 %).

Résumé ■ Depuis 1994, deux systèmes culturaux - semis direct et labour - sont comparés sur la parcelle de suivi à long terme Oberacker à l'Inforama Rütli de Zollikofen, sur un limon sableux faiblement humique. Dans le cadre d'un essai en bandes sur six soles contiguës, une rotation des six cultures suivantes a été mise en place: pois protéagineux – blé d'automne – féveroles – orge d'automne – betteraves sucrières – maïs d'ensilage. Après vingt ans d'essai, l'approvisionnement du sol en éléments nutritifs a été étudié et les rendements évalués statistiquement. Les échantillons de sol ont été prélevés par couche jusqu'à une profondeur de 50 cm et analysés pour déterminer leur teneur en carbone organique (C_{org}), en azote total (N_{tot}), en phosphore (P), en calcium (Ca), en potassium (K), en magnésium (Mg), leur pH et leur densité apparente. Contrairement à la variante avec labour, la variante avec semis direct affichait une accumulation de C_{org} , N_{tot} , K et Mg dans la couche supérieure du sol. Le pH était plus bas, tandis que le phosphore et le calcium présentaient de légers pics de concentration à environ 20 cm de profondeur. Sur l'ensemble du profil pédologique, les réserves en C_{org} étaient semblables dans les deux systèmes, quels que soient les éléments nutritifs analysés.

La moyenne du rendement relatif sur vingt ans est généralement plus élevée de 2,6 % avec le semis direct qu'avec le labour, mais la différence n'est pas statistiquement significative. Avec une rotation des cultures adaptée (dès 2000 sans pommes de terre) pendant des années au semis direct et un couvert végétal permanent, les céréales d'automne et les légumineuses ont même donné des rendements significativement plus élevés avec le semis direct qu'avec le labour.

La fumure s'effectue selon les directives des DBF-GCH (Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages; Flisch *et al.* 2009). Les quantités d'engrais épandues depuis 2008 sont indiquées dans le tableau 1. Elles sont pratiquement identiques dans les deux systèmes pour N, P, Mg, S et B, mais plus élevées dans le cas du labour pour K et Ca. Dans les deux systèmes culturaux, les engrais verts (jusqu'en 2008, moutarde sarepta, radis

Tableau 1 | Apports d'engrais minéraux (kg ha⁻¹) pendant la période de 2008 à 2014 en fonction du système cultural

Année de mise en place	N		P ₂ O ₅		K ₂ O		CaCO ₃		Mg		S		B	
	SD	L	SD	L	SD	L	SD	L	SD	L	SD	L	SD	L
2008/09	65	65	83	83	221	221	0	0	14	14	79	79	0	0
2009/10	66	66	81	81	210	210	0	0	0	0	60	60	0	0
2010/11	65	65	0	0	68	108	0	139	35	35	57	57	0	0
2011/12	71	71	0	0	0	112	19	145	0	38	88	68	5	0
2012/13	70	70	0	0	64	97	0	0	19	19	65	66	0	0
2013/14	71	71	0	0	92	138	0	0	23	23	74	74	2	2
Moyenne	68	68	27	27	109	148	3	47	15	22	71	67	1	0,3

N = azote, P₂O₅ = pentoxyde de phosphore (x 0,436 = phosphore), K₂O = oxyde de potassium (x 0,83 = potassium), CaCO₃ = carbonate de chaux (x 0,4 = calcaire), Mg = magnésium, S = soufre, B = bore, SD = semis direc, L = labour.

oléifère et vesce d'été) ont été semés après les céréales et les pois. Depuis 2009, les engrais verts sont composés d'un mélange de neuf espèces non résistantes au gel.

La lutte contre les adventices et les maladies se conforme aux directives de la production intégrée et au principe du seuil de tolérance. L'emploi des produits phytosanitaires se limite essentiellement à des herbicides sélectifs. Jusqu'en 2006, du glyphosate a été régulièrement utilisé avec le SD pour contrôler les cultures d'engrais vert et les éventuelles adventices. Depuis 2007, l'emploi de glyphosate est progressivement réduit également avec le SD. Avec le procédé L, les engrais verts, les adventices et les restes de récolte sont enfouis dans le sol lors du labour.

Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire

Au printemps 2012, alors que la teneur en eau était proche de la capacité du champ, la résistance à la pénétration a été mesurée à l'aide d'un pénétromètre jusqu'à une profondeur de 50 cm.

Le prélèvement d'échantillons a eu lieu en été 2014 après la récolte sur les quatre soles de céréales et de légumineuses. Le sol a été creusé sur un volume prédéfini (cadre métallique de 50 cm de côté) en suivant la stratification apparente et jusqu'à une profondeur de 50 cm. Les échantillons prélevés provenaient des profondeurs 0–2, 2–4, 4–8, 8–15, 15–30, 30–40 et 40–50 cm pour le SD, et des profondeurs 0–15, 15–25, 25–30, 30–40 et 40–50 cm pour L. La densité apparente a été calculée pour chaque couche à partir de la masse du sol et de l'épaisseur de la couche, déduction faite de la teneur en eau déterminée par gravimétrie. Les analyses de pH, de C_{org} et d'éléments nutritifs ont été réalisées selon les méthodes de référence des stations fédérales de recherche (1996).

Résultats

Analyses physiques du sol

Sur les 50 cm de profondeur du profil, l'évolution des courbes de densité apparente (fig. 2A) et de résistance à la pénétration (fig. 2B) sont semblables. Le SD présente des valeurs de densité apparente plus basses que le L dans les centimètres supérieurs, ce qui est sans doute dû à la teneur plus élevée en C_{org} dans cette couche avec le SD. Dans les couches suivantes, les valeurs des deux paramètres sont plus élevées avec le SD qu'avec le L, ce qui laisse supposer une sollicitation plus importante de la couche supérieure du sol, voire l'absence d'ameublissement mécanique avec le SD. Dans la couche sous-jacente du sol au contraire, la densité apparente et la résistance à la pénétration sont légèrement plus basses avec le SD qu'avec le L (fig. 2). C'est le signe que la couche sous-jacente du sol est soumise à des contraintes plus importantes avec le L.

Analyses chimiques du sol

Le pH (CaCl₂) du sol augmente légèrement plus on avance en profondeur (fig. 3). Les différences entre le SD et le L sont minimes dans la couche sous-jacente du sol, mais plus importantes dans la couche supérieure du sol: dans le cas du SD, le pH varie de 5,0 dans la couche de 5–10 cm à 5,8 dans la couche de 20–25 cm, alors qu'à ces mêmes profondeurs, les valeurs restent constantes à 5,4 avec le L.

Les teneurs en C_{org} et en N_{tot} sont plus élevées avec le SD qu'avec le L dans les couches supérieures du sol (0–10 cm) (fig. 4). Ces résultats sont dus au fait qu'avec le SD, les restes végétaux demeurent à la surface du sol et que la concentration en racines est sans doute plus importante dans cette couche. Quel que soit le système

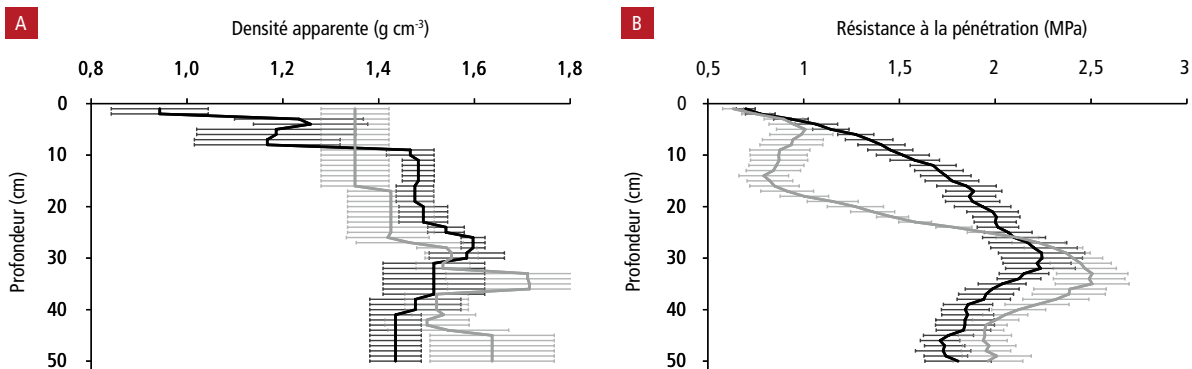


Figure 2 | Courbes de A) densité apparente et de B) résistance à la pénétration (pour une teneur en eau proche de la capacité du champ) en fonction du système cultural et de la profondeur du sol. Lignes noires = semis direct, lignes grises = labour. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs-types des moyennes.

Tableau 2 | Rendements moyens et relatifs (labour = 100 %) de toutes les cultures mises en place entre 1994 et 2014 en fonction du système cultural. Indication du rendement en dt ha⁻¹ (pour les céréales: 14 % de H₂O, pour les légumineuses: 13 % de H₂O, pour le maïs: matière sèche et pour les pommes de terre: matière fraîche) ou en t de sucre par ha⁻¹ (pour les betteraves sucrières). Les valeurs qui ne sont pas suivies des mêmes lettres se différencient de manière significative ($p < 0,05$).

Culture	n	Rendement SD	Rendement L	Rendement relatif (%)
Orge d'automne	20	65,9 a	62,2 b	105,9
Betteraves sucrières	20	11,5	11,9	96,6
Maïs d'ensilage	20	199,9	198,7	100,6
Blé d'automne	20	55,0a	51,9b	105,9
Pois protéagineux de printemps	8	42,5a	37,3b	113,7
Féveroles de printemps	6	30,9a	26,3b	117,3
Seigle d'automne	6	59,5	58,6	101,5
Pois protéagineux d'automne	5	32,1a	26,6b	120,9
Pommes de terre	5	341,1b	399,5a	85,4
Prairie temporaire	2 ¹	–	–	–
Soja	2	26,3	29,4	89,7
Féveroles d'automne	1	23,6	29,0	81,2
Blé de printemps	1	60,5	49,7	121,5
Moyenne de toutes les cultures				102,6

n = Nombre d'années d'essais avec la culture correspondante, SD = semis direct, L = labour.
¹rendement non relevé.

cultural, les teneurs en C_{org} et N_{tot} diminuent avec l'augmentation de la profondeur du sol. On constate toutefois des valeurs généralement plus élevées pour les deux paramètres avec le L à une profondeur de 20–25 cm. Sur l'ensemble du profil du sol, les quantités de C s'élèvent à 70 t ha⁻¹ pour le SD et à 73 t ha⁻¹ pour le L. Dans les deux systèmes culturaux, le rapport C/N est de 10 sur les 50 cm de profondeur; les couches affichant de teneurs élevées en C_{org} ont des pH bas.

Les teneurs en P et en Ca se répartissent de manière relativement homogène jusqu'à une profondeur de 50 cm dans les deux systèmes (fig. 5A et B). Toutefois, les deux éléments nutritifs affichent un maximum de concentration à 20–25 cm de profondeur avec le SD. Bien que pratiquement aucun engrais phosphoré n'ait été utilisé les dernières années (tabl. 1), les réserves en P dans les deux systèmes culturaux sont élevées sur l'ensemble de la profondeur étudiée (>40 mg P kg⁻¹ de sol). Des pics de concentration très nets de K et de Mg ont été observés dans les centimètres supérieurs du sol avec le SD (fig. 5). Dans la couche de 20–25 cm de profondeur, la concentration de K était plus élevée avec le L qu'avec le SD. Dans les deux systèmes culturaux, les apports de K ont été considérablement réduits à partir de l'année 2010/11: alors que les apports de K étaient du même ordre dans les deux systèmes auparavant, à partir de cette date, les apports de K dans le SD ne représentaient plus que la moitié de ceux de K avec le L (tabl. 1).

Rendements

Le tableau 2 présente les rendements moyens et relatifs (L = 100 %) de toutes les cultures mises en place pendant la durée de l'essai de 1994 à 2014. Si l'on considère l'ensemble des cultures, ces rendements sont légèrement

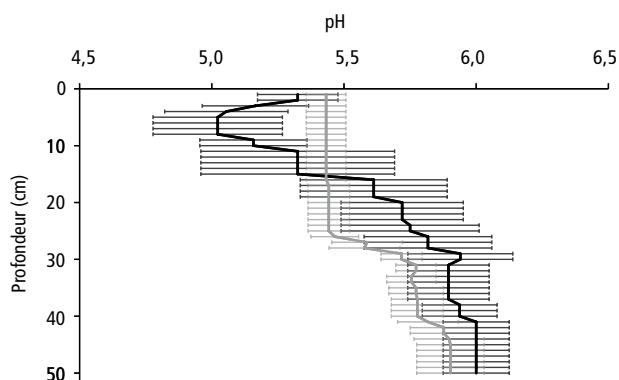


Figure 3 | Evolution du degré d'acidité (pH [CaCl₂]) dans les sols, en fonction du système cultural et de la profondeur du sol. Ligne noire = semis direct, ligne grise = labour. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs-types des moyennes.

plus élevés avec le SD (102,6 %) qu'avec le L. La différence n'est toutefois pas statistiquement significative ($p = 0,28$). La comparaison des rendements relatifs annuels (fig. 6) ne permet pas d'identifier des tendances temporelles entre les systèmes culturaux. Un rendement significativement plus élevé a toutefois été constaté avec le SD avec les cultures comme le blé d'automne, l'orge d'automne, les pois protéagineux (tant d'automne que de printemps) et les féveroles de printemps ($p < 0,05$; tabl. 2). A l'inverse, seules les pommes de terre mises en place jusqu'en 1999 ont fourni un rendement significativement plus élevé avec le L. Dans le cas du maïs et des betteraves sucrières, la mise en valeur statistique n'a montré aucune différence significative entre le SD et le L.

Discussion

La répartition du carbone organique dans le profil du sol dépend largement du système cultural. On a constaté

que la teneur en C_{org} de la couche supérieure du sol était nettement plus importante avec le SD qu'avec le L. Au contraire, à 20-25 cm de profondeur, la teneur en C_{org} était plus faible avec le SD qu'avec le L. Il fallait s'attendre à de tels résultats étant donné les travaux antérieurs (Soane *et al.* 2012). L'absence de travail du sol avec le SD a entraîné des teneurs supérieures en C_{org} et N_{tot} dans la couche supérieure du sol. Dans la zone frontalière entre la couche supérieure et sous-jacente du sol, les concentrations en C_{org} et N_{tot} plus basses avec le SD qu'avec le L s'expliquent essentiellement par le fait que les restes végétaux ne sont pas enfouis dans le sol avec ce procédé (Franzluebbers 2002). Au-delà de 30 cm de profondeur, aucune différence n'a plus été constatée entre le SD et le L en ce qui concerne la teneur en C_{org} . En additionnant les valeurs de tout le profil, on obtient une réserve de l'ordre de 70 t ha⁻¹ avec les deux systèmes. Par conséquent, il n'a pas été possible d'établir un lien entre le système cultural et les réserves en C; c'est-à-dire que, sur l'ensemble du profil de sol considéré, le SD n'a pas conduit à un stockage supplémentaire du C par rapport au procédé L.

Le système cultural influence fortement le pH (CaCl₂) du sol dans les couches supérieures. Dans la couche supérieure du sol non travaillée, les valeurs étaient plus basses que dans les surfaces labourées. Tandis que le sol était acide (dans la couche supérieure du sol) à légèrement acide (dans la couche sous-jacente du sol) avec le SD, l'acidité du sol était homogène sur tout le profil avec le L et pouvait être classé comme légèrement acide. Il existe un lien étroit entre le pH et la teneur en C_{org} : plus la teneur en C_{org} était élevée dans la couche supérieure du sol, plus le degré d'acidité était bas. Hickman (2002), Houx *et al.* (2011) et Kautz *et al.* (2013) ont également constaté que les résidus végétaux en décom-

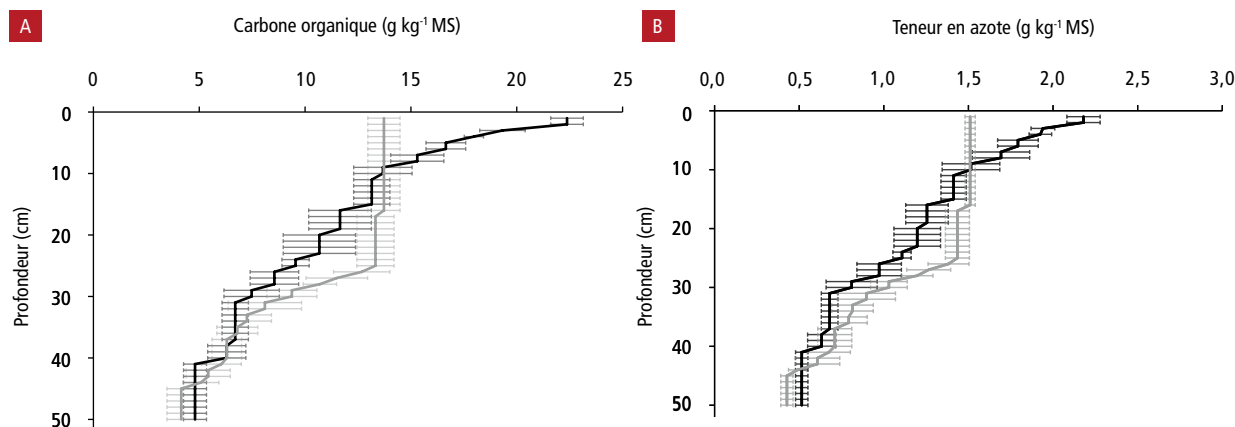


Figure 4 | Evolution de la teneur A) en carbone organique et B) en azote total, en fonction du système cultural et de la profondeur du sol. Lignes noires = semis direct, lignes grises = labour. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs-types des moyennes. MS = matière sèche.

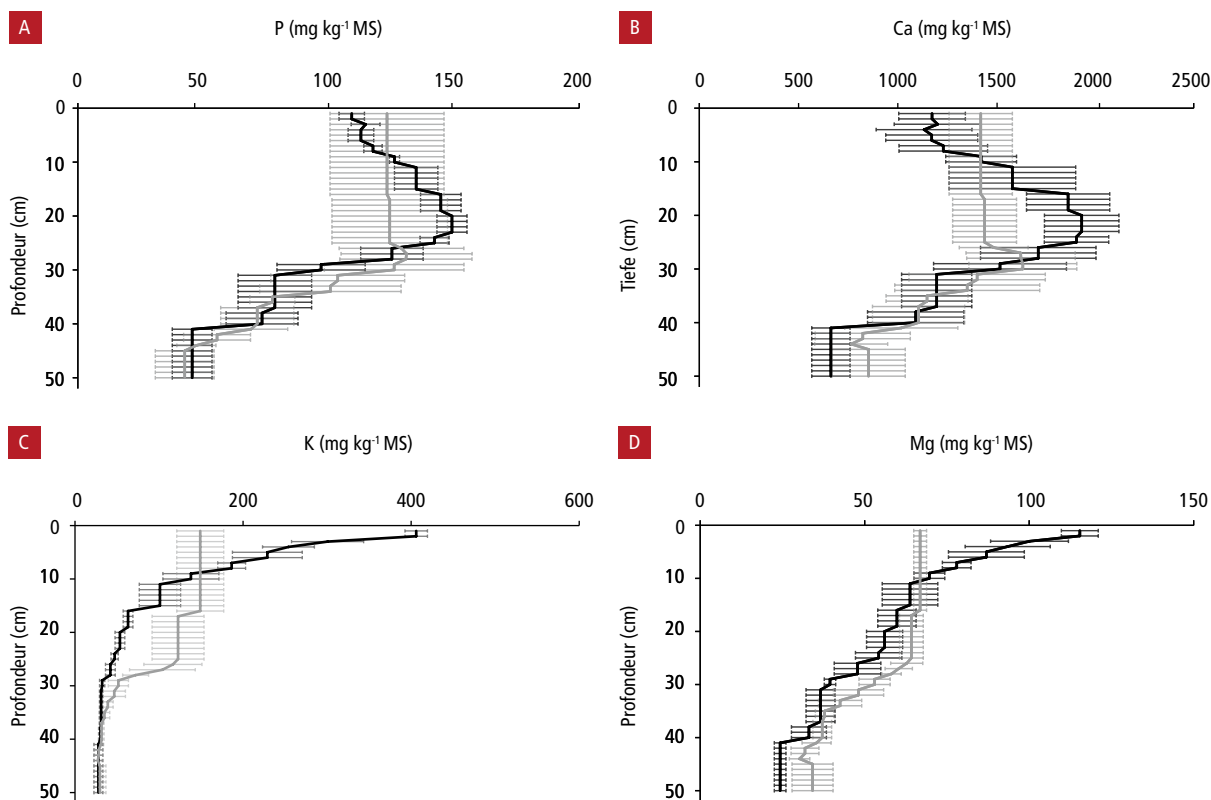


Figure 5 | Evolution de la concentration en A) P, B) Ca, C) K et D) Mg en fonction du système cultural et de la profondeur du sol. Lignes noires = semis direct, lignes grises = labour. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs-types des moyennes. MS = matière sèche.

position à la surface du sol et l'absence de travail du sol pouvaient conduire à une légère acidification de la couche supérieure.

Sur les 50 cm de profondeur du profil, les réserves de P et de Ca sont relativement uniformes quel que soit le système cultural. Toutefois, de légères concentrations maximales ont été relevées à 20–25 cm de profondeur pour les deux éléments nutritifs avec le SD. Les quatre dernières années, aucun apport de P ni de Ca n'a eu lieu sur les surfaces de SD. Grâce à la libération des éléments nutritifs contenus dans les résidus végétaux, des quantités importantes de nutriments sont mises à disposition des cultures suivantes (Noack *et al.* 2014). Les concentrations maximales relevées à 20–25 cm de profondeur sont le résultat (i) de l'absorption de nutriments par les plantes dans les couches situées essentiellement à proximité de la surface, (ii) d'un transport dirigé vers le bas ou (iii) d'une combinaison des deux processus. Le transport dirigé vers le bas pourrait être stimulé par la disposition continue des macropores avec le SD. Dans la couche sous-jacente du sol, aucune différence de teneurs en P ou en Ca n'a été observée entre le SD et le L. La teneur maximale en P liée à la profondeur semble être un phénomène stable avec le SD: Sturny *et al.* (2007) ont constaté une accumulation de P à Oberacker à 15-20 cm de profondeur dès dix ans d'essai.

Avec le SD une accumulation de Mg et de K a été constatée dans les couches supérieures du sol. La concentration de Mg et de K était plus élevée de 50 % à 0–2 cm de profondeur et de 75 % à 10–30 cm de profondeur. Bien que les apports d'engrais aient été plus importants avec le L qu'avec le SD, le travail du sol dans le cas du L a empêché la formation d'un tel gradient de concentration.

Toutes cultures confondues et pendant les vingt ans d'essai, le rendement relatif moyen avec le SD (102,6 %) ne se distingue pas de manière significative de celui obtenu avec le L. Soane *et al.* (2012), Derpsch *et al.* (2014) et Pittelkow *et al.* (2014) indiquent qu'avec un système de SD bien géré, les restes végétaux doivent rester à la surface du sol et qu'une rotation équilibrée, adaptée au SD doit être mise en place (y compris engrais vert). C'est pourquoi, un rendement relatif généralement plus élevé a pu être obtenu à Oberacker avec le semis direct par rapport au L, bien que sur ce site d'essai, selon la classification de Pittelkow *et al.* (2014), les conditions climatiques soient humides, c'est-à-dire défavorables au SD. D'autre part, l'essai était axé non pas sur la maximisation des rendements d'une seule culture, mais sur l'optimisation du rendement de l'ensemble de la rotation. Comme dans le cas du SD, le sol n'est pas ameubli mécaniquement, tout compactage est particulièrement préjudiciable. Afin de minimiser un tel

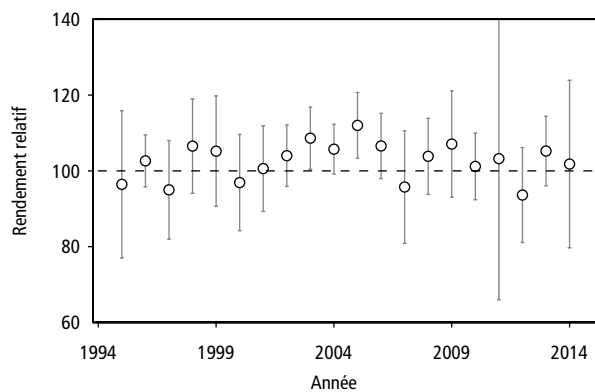


Figure 6 | Rendement relatif pour la période 1994–2014. Ronds clairs = semis direct, ligne horizontale en pointillés = labour (= 100 %). Chaque rond clair correspond à la moyenne de six cultures (= rendement relatif annuel). Les barres d'erreur correspondent aux erreurs-types des moyennes.

risque, par exemple pour la récolte de betteraves sucrières, celles-ci sont récoltées relativement tôt. Toutefois, une récolte précoce a des conséquences négatives sur le rendement en betteraves et en sucre avec le SD. Étant donné leur croissance plus lente au départ, les betteraves sucrières se développent plus tardivement avec le SD qu'avec le L et arrivent plus tard à maturité.

Avec le SD, les rendements des pommes de terre étaient significativement plus bas qu'avec le L, ceux des betteraves sucrières avaient tendance à l'être aussi. Avec le SD, la densité plus élevée de la couche supérieure du sol pourrait être plutôt défavorable aux cultures à racines et à tubercules et expliquer ce phénomène. Jusqu'en 1999, les pommes de terre faisaient partie de la rotation, mais n'ont plus été cultivées depuis 2000. La technique de mise en place choisie pour cette culture avec le SD, la plantation directe sous couvert, n'était pas suffisamment développée, ce qui s'est traduit par un fort pourcentage de tubercules endommagés par des mottes dures. Dans le cas des légumineuses et des céréales, les rendements relatifs étaient par contre significativement plus élevés avec le SD qu'avec le L. Les différences parfois importantes ne s'expliquent ni par la pression variable des adventices ou des maladies, ni par le climat humide d'Europe centrale. Les légumineuses se développaient bien alors que, selon Håkansson (2005), elles sont particulièrement sensibles au compactage du sol. Avec le SD, la couche supérieure du sol est plus résistante à la pénétration et plus dense qu'avec le L à partir de 10 cm de profondeur. Néanmoins, les légumineuses ont développé suffisamment de racines et de rhizobies essentielles à leur croissance. Ces résultats viennent étayer la thèse selon laquelle les sols labourés n'offrent pas forcément les meilleures conditions pour une croissance optimale des plantes (Reichert *et al.* 2009). Il est possible que la plus haute densité apparente du sol

soit compensée par les teneurs plus élevées en éléments nutritifs dans la couche supérieure du sol. Par contre, les rendements supérieurs des céréales avec le SD sont faciles à expliquer: le blé et l'orge réagissent en général de manière moins sensible aux sols plus denses (Håkansson 2005).

Les rendements plus élevés avec le SD pourraient également s'expliquer par le meilleur approvisionnement en eau des racines. Sturny *et al.* (2007) ont constaté qu'avec le SD, il y avait davantage d'eau du sol disponible pour les plantes et que les plantes mises en place par semis direct pouvaient s'alimenter en eau en continu, même pendant les périodes de sécheresse. La régression «rendement de différentes cultures vs précipitations dans des périodes de croissance données» n'a pas permis d'établir un rapport avec les rendements.

Conclusions

- Les réserves d'éléments nutritifs étaient aussi élevées dans les deux systèmes culturaux, sur les 50 cm de profondeur analysés et pour tous les éléments étudiés. Avec le SD, les éléments nutritifs N_{tot} , K et Mg présentaient un profil en profondeur moins homogène qu'avec le L et une accumulation dans les couches supérieures du sol. Par rapport aux autres nutriments, le P et le Ca étaient répartis de manière plus homogène sur toute la profondeur du sol avec le SD. On a cependant pu observer des concentrations maximales de ces éléments aussi à environ 20–25 cm de profondeur avec le SD. C'est pourquoi, lorsque le SD est pratiqué sur plusieurs années, il faut sans doute adapter les apports d'engrais et les DBF-GCH en conséquence.
- La teneur en C_{org} était significativement plus élevée dans la couche supérieure du sol avec le SD qu'avec le L. Sur l'ensemble du profil, il n'a toutefois pas été possible de constater une séquestration plus importante de carbone avec le SD par rapport au L.
- Toutes cultures confondues, le rendement relatif moyen avait tendance à être plus élevé de 2,6% avec le SD qu'avec le L. Avec le SD, des rendements relatifs significativement supérieurs ont été obtenus pour les céréales d'automne et les légumineuses, tandis que les pommes de terre, cultivées jusqu'en 1999, ont donné des rendements significativement plus bas avec le SD qu'avec le L. Dans le cas des betteraves sucrières, les rendements étaient généralement plus faibles avec le SD qu'avec le L. Les résultats montrent qu'avec le SD, il est possible d'obtenir des rendements aussi élevés, voire plus élevés qu'avec le L, et ce, même dans le climat tempéré d'Europe centrale. L'important pour la réussite du SD est de choisir une rotation des cultures bien adaptée et de laisser suffisamment de résidus végétaux à la surface du sol. ■

Riassunto**Resa e parametri pedologici dopo 20 anni di semina diretta e aratura**

Dal 1994, sulla superficie di osservazione sul lungo periodo Oberacker presso il centro Inforama Rütli a Zollikofen, vengono confrontati i due sistemi di coltivazione della semina diretta e dell'aratura su argilla sabbiosa povera di humus. In una prova sulle file con sei diverse parcelle, nell'ambito di una rotazione colturale vengono coltivate le sei colture piselli proteici, frumento autunnale, fave, orzo autunnale, barbabietole da zucchero e silomais. Dopo 20 anni di sperimentazione è stato analizzato l'apporto di sostanze nutritive del suolo e sono state valutate statisticamente le rese. Prelevati a strati fino a una profondità di 50 cm, i campioni di terreno sono stati analizzati per rilevare carbonio organico (C_{org}), contenuto totale di azoto (N_{tot}), fosforo (P), calcio (Ca), potassio (K), magnesio (Mg), valore di pH e densità di stratificazione. A differenza di quanto riscontrato nel sistema dell'aratura, nella semina diretta è stato rilevato un arricchimento di C_{org} , N_{tot} , K e Mg nello strato superiore del suolo, mentre il valore di pH era inferiore, e P e Ca presentavano lievi picchi di concentrazione a circa 20 cm di profondità. Osservandolo per tutto il profilo del suolo, il livello di C_{org} e di tutti gli elementi nutritivi esaminati era analogamente elevato in entrambi i sistemi.

In media la resa relativa nel corso del ventennio è tendenzialmente maggiore del 2,6 per cento nella semina diretta rispetto all'aratura, ma non è significativamente più alta. Nella rotazione colturale adeguata per molti anni alla semina diretta (dal 2000 senza patate) con copertura permanente del suolo, i cereali invernali e le leguminose coltivati con il sistema della semina diretta hanno prodotto rese addirittura significativamente più elevate che nei terreni arati.

Summary**Crop yield, and nutrients in the soil profile after 20 Years of no-till and conventional tillage**

No-till and conventional plough tillage have been compared since 1994 in the Oberacker long-term field experiment at Inforama Ruetti in Zollikofen (Switzerland) on a slightly humic sandy loam soil. Crops were grown in a six-year crop rotation (peas, winter wheat, field beans, winter barley, sugarbeets and silage maize) in a strip trial with six adjoining plots. Twenty years into the trial, soil nutrient status was investigated and crop yields were statistically analysed. Soil was sampled layer-by-layer down to a depth of 50 cm, and analysed for soil organic carbon (C_{org}), total nitrogen content (N_{tot}), phosphorus (P), calcium (Ca), potassium (K) and magnesium (Mg) content, as well as pH and bulk density. Unlike in the conventional tillage system, C_{org} , N_{tot} , K and Mg were concentrated in the surface layer in the no-till system; in addition, the pH was lower and P and Ca had slight concentration maxima at around 20 cm depth. Although the distribution of C_{org} and nutrients differed significantly between no-till and conventional tillage, stocks of C_{org} and of all investigated nutrients were similar in both systems. The relative yield averaged over 20 years was 2.6% higher in no-till than in conventional tillage, but the difference was not significant. Winter cereals and legumes had significantly higher yields in the no-till system than in conventionally tilled soils. We conjecture that one of the reasons for the higher crop yields in no-till in the Oberacker long-term field experiment (since 2000 without potatoes) was the well-balanced crop rotation, including cover crops.

Key words: tillage system, no-tillage, mould-board ploughing, yield, crop rotation, nutrient storage, soil organic carbon.

Bibliographie

- La bibliographie est disponible auprès des auteurs.